УДК 004.415

Л.И. Тимченко, Н.С. Петровский, Н.И. Кокряцкая, Л.В. Марченко
Государственный экономико-технологический университет транспорта, г. Киев
Украина, г. Киев, 49, 03049, ул. Н. Лукашевича

Метод классификации пятен лазерных пучков с применением параллельно-иерархических сетей на базе ПЛИС

L.I. Timchenko, N.S. Petrovsky, N.I. Kokryatskaya, L.V. Marchenko
State Economic and Technological University of Transport, Kiev
Ukraine, Kiev, 49, 03049, st. N. Lukashevich

Classification Method of Laser Beam Spots Using a Parallel-Hierarchical Networks on FPGA

Л.І. Тимченко, Н.С. Петровський, Н.І. Кокряцька, Л.В. Марченко
Державний економіко-технологічний університет транспорту, м. Київ
Україна, м. Київ, 49, 03049, вул. Н. Лукашевича

Метод класифікації плям лазерних пучків із застосуванням паралельно-ієрархічних мереж на базі ПЛІС

В статье рассматривается метод классификации пятен лазерных пучков и его реализация. Обсуждается необходимость фильтрации зашумленных изображений адаптивными методами, такими как параллельно-иерархические (ПИ) сети. Представленная реализация такой сети на базе ПЛИС.
Ключевые слова: ПИ сети, «грубая-точная» оценка, лазерный пучок.

In this paper the method of classification of spots of laser beams and its implementation. Discusses the need for filtering noisy images with adaptive methods, such as parallel-hierarchical (IP) network. Presented implementation of such a network on FPGA.
Keywords: PH network, «rough-accurate» estimate, laser beam.

У статті розглядається метод класифікації плям лазерних пучків і його реалізація. Обговорюється необхідність фільтрації зашумлених зображень адаптивними методами, такими як паралельно-ієрархічні (ПІ) мережі. Представлена реалізація такої мережі на базі ПЛІС.
Ключові слова: ПІ мережа, «груба-точна» оцінка, лазерний пучок.

Введение

Одним из направлений современных систем коммуникации, которые быстро развиваются, есть спутниковые и космические лазерные линии связи [1], [2] .

Внимание к подобным системам вызвано двумя причинами:

1. Энергетическая эффективность – лазерным системам передачи необходимо значительно меньше энергии чем классическим радиосистемам, для передачи на то же расстояние, через малое расхождение луча.

2. Скорость – при такой же мощности лазерные системы позволяют передавить значительно больше информации. Что необходимо в дальнейших исследованиях солнечной системы.

Однако малое расхождение луча является также одним из основных технических сложностей в построении подобных систем. Поскольку в принимающее устройство необходимо попасть лучом с расстояния десятки – сотни тысяч километров, и при этом, передатчик постоянно движется. А значит, приемник должен отслеживать его положение.

Для таких устройств необходимо находить координаты спутника с высокой точностью. Однако, проходя сквозь атмосферу лазерное излучение, испытывает значительные препятствия. Если же энергетическое ослабление лазерного луча при распространении его в атмосфере приводит к ограничению дальности действия лазерных устройств коммуникации и навигации, то его влияние на структуру пучка и траекторию его распространения определяет в определенной степени параметры точности таких устройств. Световая волна, распространяющаяся в атмосфере, кроме энергетических потерь имеет флуктуации амплитуды и фазы. Эти флуктуации происходят благодаря случайно-временному распределению показателя преломления, которое, в свою очередь, обусловлено турбулентными движениями в атмосфере, влекущие случайное изменение температуры.

Турбулентность атмосферы вызывает искривление волнового фронта волны, которое приводит к расширению лазерного пучка, перераспределения энергии внутри пучка и изменения его «центра тяжести», а также к связанным с этими явлениями флуктуациями общей интенсивности [3], [4].

Конечно, измерения координат объектов происходит с помощью геометрических моментов [5-7], использование которых в задачах измерения координат энергетических центров лазерных изображений, которые деформированы атмосферой, приводит к существенной погрешности при измерении. Погрешность измерения координат энергетических центров лазерных изображений составляет до 10 пикселей. Поэтому актуальной становится задача классификации изображений протяженной лазерной трассы, в случае, когда на изображение действует много деформирующих факторов. При этом сохраняя паритет между скоростью вычислений и энергоэффективностью схемы.

1 Алгоритм прямого параллельно-иерархического преобразования

Обычно для коррекции энергетического «центра тяжести» используют хорошо проработанные методы, использующие фильтрацию и классификацию изображений, и не требуют сложных вычислений. К таким методам относится, разработан и реализован на ПЛИС авторами метод сечений [8]. Однако на больших расстояниях необходима адаптивная фильтрация, для чего можно использовать такой класс методов классификации, как нейронные сети.

Одним из направлений интерпретации работы нейронных сетей является представление его в виде возбуждений, одновременно распространяются, и в котором действие одной нейронной сети возбуждает соответствующий отклик в другой. Тогда восприятие времени и причинно-следственных связей, настолько сложны для программирования, закладываются в архитектуру таких нейронных систем, и такие сети называются параллельно-иерархическими (ПИ) [9].

Рассмотрим сетевой процесс прямого параллельно-иерархического преобразования [10]. Пусть есть $S\,(S = 1, 2, 3\,...)$ непустых множеств элементов, задающих информацию. Количество элементов множества назовем его длиной (обозначение

L_μ – длина множества μ). Количество разнообразных элементов множества назовем размерностью данного множества (обозначение R_μ).

Рассмотрим математическую модель параллельного разложения множества $\mu = \{a_i\}, i = \overline{1, n}$. По следующей модели:

$$\sum_{i=1}^{n} a_i = \sum_{j=1}^{R} \left(n - \sum_{k=0}^{j-1} n_k \right) \left(a^j - a^{j-1} \right), \quad (1)$$

где $a_i \neq 0$, R – размерность данного множества. Из одинаковых элементов сформируем подмножества, элементы одного подмножества обозначим через, a^k, $k = \overline{1, R}$, n_k – количество элементов в *k*-м подмножестве (т.е. кратность числа $a_к$), a^t – произвольный элемент множества $\{a^k\}$, избранный на *j*-м шаге, $j = \overline{1, R}$, $a^0 = 0$, $n_0 = 0$.

Если в модели (1) осуществить замену знака $\sum$ на объединение $\cup$, то результатом разложения множества μ является объединение элементов (множество разложения μ^1).

$$\mu = \bigcup_{i=1}^{n} a_i = \bigcup_{j=1}^{R} \left(n - \sum_{k=0}^{j-1} n_k \right) \left(a^j - a^{j-1} \right) \quad (2)$$

Преобразование множества μ в множество μ^1, задаваемой моделью (2), назовем оператором преобразования G, т.е.

$$G(\mu) = \mu^1 \quad (3)$$

Если для выходных массивов S применим оператор преобразования G, который задается формулой (2), то для каждого массива получим свое порядковое разложения:

$$\mu_1^1 = \bigcup_{i=1}^{R_1^1} a_{1i}^i, \quad \mu_2^1 = \bigcup_{i=1}^{R_2^1} a_{2i}^i, \quad \ldots, \quad \mu_s^1 = \bigcup_{i=1}^{R_s^1} a_{si}^i, \quad (4)$$

где μ^1_s – множество под номером S на первом уровне, тогда для *k*-го уровня множество под номером 1 запишется соответственно μ_l^k, R^1_s – количество элементов во множестве на первом уровне , R^1_s – количество элементов в множестве S на *1*-м уровне, R^1_k – количество элементов в множестве S на *k*-м уровне. Объединим полученные элементы (4) в матрицу M_1, назовем ее матрицей прямого разложения на первом уровне. Тогда она будет иметь вид:

$$M_1 = \begin{pmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 & \ldots & a_{1R_1^1}^1 X & \ldots & X \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 & \ldots & \ldots & \ldots & a_{2R_2^1}^1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{S1}^1 & a_{S2}^1 & \ldots & a_{SR_S^1}^1 X & \ldots & X \end{pmatrix}, \quad (5)$$

или

$$M_1 = \bigcup_{S=1}^{S} \left(\bigcup_{i=1}^{R_S^1} a_{si}^1 \right). \quad (6)$$

Для удобства записи вакантные места в матрицах будем заполнять значком «Х». Не нарушая общности для наглядности, вторая строчка в (4) имеет максимальную длину. Очевидно, что такую длину может иметь любая строчка.

Матрицу M_1 перепишем, сгруппировав ее элементы не по строкам, а по колонкам и таким способом сформируем новую матрицу:

$$M_1^T = \bigcup_{i=1}^{R_S^1} \left(\bigcup_{S=1}^{S} a_{si}^1 \right). \tag{7}$$

т.е. матрицу M_1 – транспонирует. Обозначим через Т оператор транспонирования матрицы, тогда

$$T(M_1) = M_1^T .$$

Начиная со второго уровня, образования матриц $M_2^T, M_3^T, \ldots, M_k^T$ происходит не только с помощью транспонирования как в (7). Будем группировать элементы не по колонкам, а за диагоналями и полученные множества назовем диагональными. Обозначим оператором S – оператор сдвига строки на величину меньшую номера данной строки на единицу и исключение первого столбца матрицы M_2 в результат разложения.

Таким образом, $S(M_2) = M_2''$, в общем случае $S(M_j) = M_j''$, $j = \overline{1, k}$.

Последовательное применение трех операторов G, S, T назовем функционалом Ф, т.е.

$$\underset{t=2}{\overset{k}{\Phi}} \left[T \left(G \left(\bigcup_{S=1}^{S} \mu_S \right) \right) \right] = \bigcup_{t=2}^{k} a_{11}^t \tag{8}$$

μ_S начальные множества $(S = 1, 2, 3, \ldots)$, a_{11}^t – элементы разложения начальных множеств, получаемые по одному на каждом уровне, начиная со второго.

Таким образом, сетевой метод прямого ПИ преобразования заключается в последовательном применении к исходным множествам $\bigcup_{S=1}^{S} \mu_S$ по одному разу операторов преобразования G и транспонирования T, а потом $(k-1)$ раз функционала Φ. На каждом уровне ПИ преобразования образуются по одному элементу a_{11}^k разложения S – выходных множеств, где a_{11}^k – исходная информация прямого ПИ преобразования. Этой информацией является диагональные множества с одной диагонального кратного общего элемента.

Для демонстрации модели рассмотрим числовой пример прямого ПИ преобразования с использованием, например преобразования G, информация которой задана в виде числовых множеств μ_1, μ_2, μ_3:

$$\mu_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 5 \\ 7 \end{pmatrix} \qquad \mu_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \\ 9 \\ 10 \end{pmatrix} \qquad \mu_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ 15 \\ 20 \end{pmatrix}$$

Применяя модель вида (2), получим:

$$G(\mu_1) = (8 \quad 3 \quad 4 \quad 2)$$
$$G(\mu_2) = (4 \quad 9 \quad 10 \quad 1)$$
$$G(\mu_3) = (9 \quad 24 \quad 5)$$

Из полученных результатов построим матрицы:

$$M_4 = \begin{pmatrix} 2 & 2 & X & X \\ X & 12 & 16 & X \\ X & X & 4 & 11 \\ X & X & X & 4 \end{pmatrix} \Rightarrow a_{11}^3 = 2$$

$$M_5 = \begin{pmatrix} 4 & 10 & X & X \\ X & 8 & 12 & X \\ X & X & 8 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow a_{11}^4 = 4$$

$$M_6 = \begin{pmatrix} 16 & 2 & X \\ X & 16 & 4 \\ X & X & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow a_{11}^5 = 16$$

$$M_7 = \begin{pmatrix} 4 & 14 & X \\ X & 8 & 3 \end{pmatrix} \Rightarrow a_{11}^6 = 4$$

$$M_8 = \begin{pmatrix} 16 & 6 \\ X & 3 \end{pmatrix} \Rightarrow a_{11}^7 = 16$$

$$M_9 = (6 \quad 3) \Rightarrow a_{11}^8 = 6$$

$$M_{10} = (3) \Rightarrow a_{11}^9 = 3$$

Результат прямого ПИ преобразования:

$$\mathop{\Phi}_{t=2}^{10}\left[T\left(G\left(\bigcup_{i=1}^{3}\mu_i\right)\right)\right] = (12,\ 16,\ 2,\ 4,\ 16,\ 4,\ 16,\ 6,\ 3). \qquad \sum_{i=1}^{10}\mu_i = 79.$$

Учитывая вычислительную сложность алгоритма прямого ПИ преобразования с позиции схемотехники, можно сделать вывод, что наиболее трудоемкой является операция G преобразования, операции же S и T по своей сути являются операциями с памятью, а значит требуют менее сложных аппаратных средств.

2 Разработка метода «грубой-точной оценки» пятен лазерных пучков с использованием метода прямого параллельно-иерархического преобразования

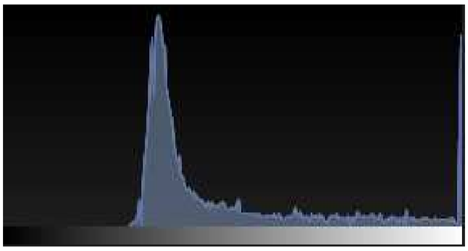
Для решения поставленной задачи можно использовать двухэтапный алгоритм классификации пятен лазерных пучков, на первом этапе которого находятся координаты изображения и проводится сегментация изображений пятен лазерных пучков, например на базе параллельной схемы предложенного авторами метода сечений [8].

Изображения лазерных пятен имеют перепад яркости, при переходе к изображению лазерного пятна, что отчетливо видно на гистограмме рис. 1.

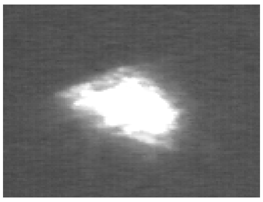
В левой половине гистограммы находятся шумы, которые не несут важной информации для ПИ преобразования. А значит, сегментация может быть проведена пороговым фильтром с двойной границей [11], по следующей формуле:

$$\begin{cases} w(f(x,y))=0, \quad w(f(x,y))\le W_{0,5} \\ w(f(x,y))=w(f(x,y))-W_{0,5}, \quad W_{0,5}<w(f(x,y))<W_{0,75} \\ w(f(x,y))=0, \quad w(f(x,y))\ge W_{0,75} \\ W_{0,75}=W_{\max}\cdot 0,75 \quad i \quad W_{0,5}=0,5\cdot W_{\max} \end{cases} \tag{9}$$

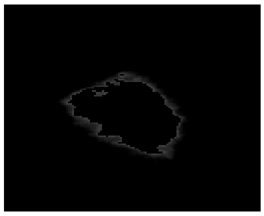
где $w(f(x,y))$ – значение яркости точки, $W_{\max}$ – максимальная яркость изображения.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Гистограмма яркостей (а) пятна лазерного пучка (б)
и пятно лазерного пучка после сегментации (в)

На втором же этапе проводится корреляционная оценка хвостовых элементов изображения по методу прямого параллельно-иерархического преобразования.

Таким образом, общий алгоритм высокоточной классификации пятен лазерных пучков выглядит следующим образом:

1. Находим координаты изображения и проводим сегментацию.
2. Находим хвостовые элементы для сохранённого изображения методом прямого ПИ преобразования.
3. Формируем эталонное изображение – среднее значение хвостовых элементов первых 20 изображений.
4. Вычисляем коэффициент корреляции между хвостовыми элементами эталонного изображения и текущим изображением.
5. Если коэффициент корреляции выше 0,9 то изображение «хорошее».
6. Повторяем пунктик 4 – 6 для каждого следующего изображения.

Для создания схемы обработки изображений проводилось моделирование алгоритма на компьютере на реальных снимках лазерных трасс, с целью выявления характеристик изображений важных для создания схемы.

Как следствие, моделирование прямого ПИ преобразования показало, что максимальное количество строк исходной матрицы при преобразовании не превышает 120 , а максимальное число не превышает 210.

Таким образом, можно задаться такими начальными параметрами для создания схемы ПИ преобразования. Будем использовать 16 разрядные слова. Поскольку исходное изображение имеет размер 128×128, то и максимальное количество строк для G преобразования, тоже составляет 128 .

3 Разработка схемы устройства классификации пятен лазерных пучков метода «грубо-точной» оценки пятен лазерных пучков с использованием метода прямого параллельно-иерархического преобразования

Согласно требованиям, изложенным в предыдущем пункте общая блок схема разработанного устройства представлена на рис. 2. Моделирование проводилось с использованием программы Quartus II компании Altera.

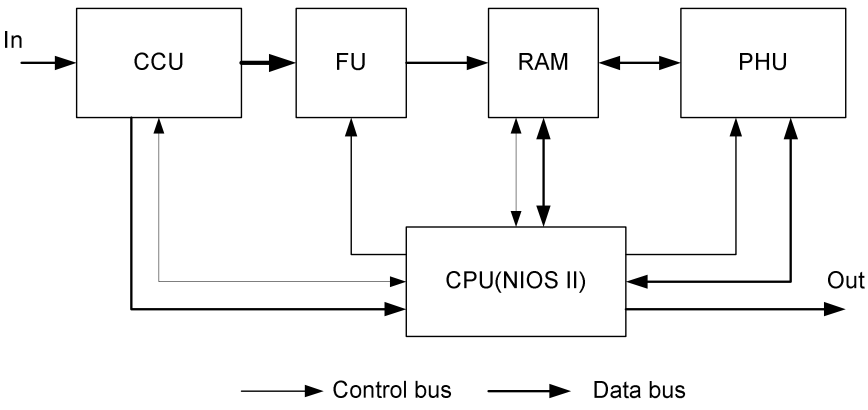


Рисунок 2 – Блок схема устройства классификации пятен лазерных пучков на базе прямого ПИ преобразования

Устройство работает следующим образом:

Данные с камеры подаются на вход CCU – coordinate calculation unit – что находит координаты энергетического центра, а также значение $W_{0.5}$ и $W_{0.75}$, выведенные наружу блока для дальнейшей обработки в пороговом фильтре – FU (filter unit). Данные после фильтра попадают в запоминающееся устройство RAM. И далее попадают в блок параллельно- иерархического преобразования PHU . На выходе этого блока формируются данные *G* преобразования.

Управляет всем процессом встроенный контролер CPU (типа NIOS II), он же и отвечает за внешнюю коммуникацию (Out) .

Блок параллельно-иерархического преобразования (PHU), представленный на рис. 3 . Описание выводов схемы представлен в табл. 1 .

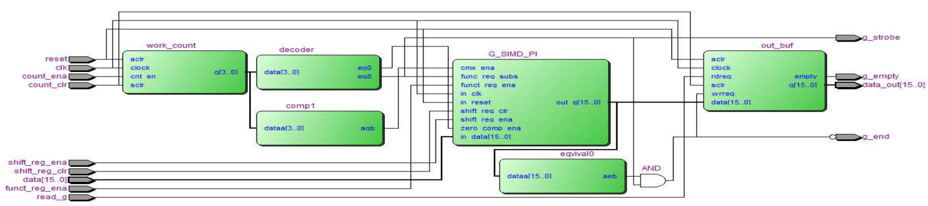


Рис.3 Блок параллельно-иерархического преобразования

Таблица 1 – Выводы блока параллельно- иерархического преобразования

Шина	Тип	Описание
reset	Вход	Общее скидывание схемы
clk	Вход	Вход тактовой частоты
count_ena	Вход	Вход разрешения работы счётчика
count_clr	Вход	Сброс счётчика
shift_reg_ena	Вход	Вход разрешения работы регистра сдвига
shift_reg_clr	Вход	Очистка регистра сдвига
funct_reg_ena	Вход	Строб функционального регистра.
data [16]	Вход	Шина ввода данных
read_g	Вход	Строб считывания с входного буфера
read_g	Выход	Выход данных (g функции)
g_strobe	Выход	Выход индикации обработки одного члена рядка
g_empty	Выход	Выход индикации полностью очищенного буфера
g_end	Выход	Выход индикации окончания g преобразования

В этот блок введен регистра сдвига (находится в блоке G_SIMD_PI), что позволяет делать последовательный ввод данных, а также устройство управления (конечный автомат) на базе счетчика work_count и декодера (decoder). Итак, схема работает следующим образом.

На первом этапе, после общего сброса схемы, ее приводят в исходное состояние представлению «1» в течение одного такта на вход shift_reg_clr. Далее подают «1» на вход shift_reg_ena и через шину данных data загружают последовательно данные в регистр сдвига.

Далее подают «1» в течение одного такта вход funct_reg_ena, в результате чего данные из регистра сдвига поступают на вход функционально-запоминающих элементов рис 4:

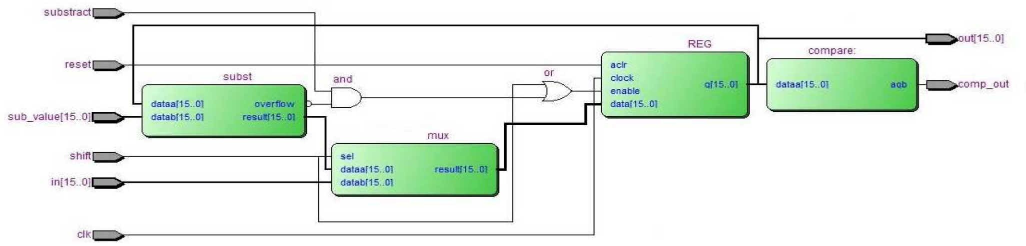


Рисунок 4 – Функционально-запоминающий элемент

Функционально-запоминающий элемент состоит из следующих блоков: входного мультиплексора – mux; регистра хранения – REG, блока вычитания – subst, и выходного компаратора compare.

Таблица 2 – Описание выводов функционально-запоминающего элемента

Название вывода	Направление	Описание
reset	Вход	Начальный сброс
substruct	Вход	Команда проведения вычитания.
shift	Вход	Команда переноса даннях с входа к регистру
clk	Вход	Тактовая частота
in	Вход	Входная шина данных
out	Выход	Выходная шина данных
Sub_value	Вход	Число, которое вычитается
comp_out	Выход	Выход компаратора

Функционально-запоминающий элемент может работать в двух режимах: загрузка данных, при этом на вход shift подается «1». Или вычитания, когда от числа, которое находится в регистре REG, вычитается число, подаваемого на вход Sub_value, для чего подают «1» на вход substruct. При этом результат операции сохраняется в том же регистре REG. На выходе же comp_out компаратора – «1» появляется только тогда, когда в регистре REG число больше «0». Временная диаграмма работы данного элемента представлена на рис. 5.

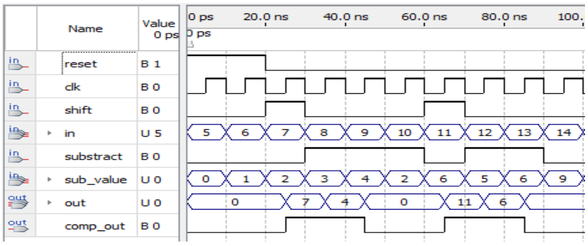


Рисунок 5 – Диаграмма работы функционально-запоминающего элемента

На втором этапе подается единица в течение одного такта на вход count_clr счетчика work_count, что приводит счетчик в исходное состояние, а затем его вход count_ena подают «1», и он начинает через декодер (decoder) подавать команды на блок G_SIMD_PI, в результате чего данные проходят по двоичному дереву [12], элементарные блоки которого представлены на рис. 6, а функции входов в табл. 4.

$$n = L - 1. \tag{10}$$

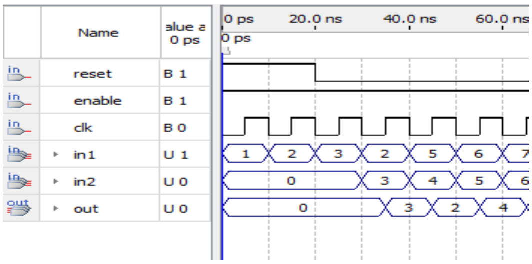


Рисунок 6 – Диаграмма работы схемы двоичного поиска

В процессе прохождения по двоичному дереву находится минимальное число, и на 8 такте это число, умноженное на количество не нулевых элементов строки, появляется на выходе блока G_SIMD_PI, то есть первый член *G* преобразования. Одновременно с этим на выходе g_strobe появляется «1», сигнализируя о том, что найдено член *G* преобразования, и позволяет контроллеру забрать его из буфера, не дожидаясь окончания всего преобразования. На 9 же такте это число заносится в буфер out_buf .

Далее счетчик начинает считать сначала, и через каждые 9 тактов в буфер заносится новый член *G* преобразования, так продолжается до тех пор, пока входная строка не станет равна нулю, и на выходе g_end появляется единица, сигнализируя о том, что преобразование закончено.

На третьем этапе контроллер подает «1» на вход read_g, и может считывать данные из буфера на выходе read_g, по окончании чтения, на выходе g_empty появляется «1».

Очевидно, что каждая следующая строки данных, работа всех этапов независимая, а следовательно, не дожидаясь окончания первого G преобразования, можно загрузить в регистр сдвига данные следующей строки, и также одновременно из *G* преобразованием возможно забирать данные из выходного буфера.

Таким образом, время работы данной схемы в тактах (для наихудшего случая) составляет:

$$T = L(\log_2 L + 2). \quad (11)$$

Моделирование на базе чипа Cyclone IV (EP4CE22F17C6) показало следующие данные, необходимы для PHI:

Total logic elements 11,678 / 22,320 (52 %)

Total memory bits 2,048 / 608,256 (< 1 %)

Embedded Multiplier 9-bit elements 2 / 132 (2 %)

Fmax-124.32 MHz

Быстродействие же полной схемы при обработке реальных изображений пятен лазерных пучков составила основной рабочей частоте 100 МГц) составила :

Средняя – 6 мс/кадр

Максимальное время обработки кадра – 20 мс/кадр.

Средняя погрешность вычисления координат – 0.47.

Итак, разработана схема позволяет проводить одновременные последовательные загрузки и чтения данных.

– Операция G преобразование происходит самостоятельно, и не требует постоянного участия контроллера, разгружает его для других операций.

– Разработанная схема удовлетворяет начальным требованиям и имеет запас как по разрядности, так и возможности ее наращивания.

4. Моделирование метода «грубой-точной оценки» пятен лазерных пучков с использованием прямого параллельно-иерархического преобразования

С целью проверки разработанных алгоритмов и моделей был создан макет устройства обработки пятен лазерных пучков, представленный на рис. 7.

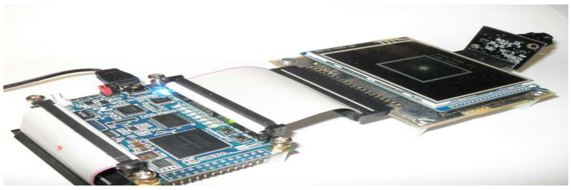


Рисунок 7 – Макет устройства обработки пятен лазерных пучков

Для создания макета были использованы следующие компоненты:

– плата разработчика DE0-Nano на базе ПЛИС типа Altera Cyclone ® IV EP4CE22F17C6N;

– CMOS камера 640 * 480 на базе чипа OV7660;

– дисплей TFT 320 * 240 точек на базе контроллера SPFD5408;

– лазерный диод с длиной волны 532 нм (зеленого цвета).

Поскольку ПЛИС имеет значительно меньшее энергопотребление в сравнении с обычным компьютером, то было проведено несколько тестов по потреблению мощности по сравнению с персональным компьютером (на базе процессору AMD Athlon X4 640). Результаты сравнения представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Сравнительная характеристика затрат мощности при обработке пятен лазерных пучков с помощью параллельно-иерархических сетей

Платформа	Средняя скорость вычисления, мс	Средняя мощность, Вт	Производительность кадров /вт
Персональный компьютер (AMD Athlon X4 640)	90	36	0,31
EP4CE22F17C6N	7	2,5	**57**

Таким образом, с физического моделирования (табл. 5) можно сделать вывод, что центральный процессор обычного персонального компьютера не может быть использован для обработки в реальном времени, поскольку среднее время обработки более чем в два раза превышает время поступления кадров (для камеры со скоростью 25 кадров/с, соответственно время обработки одного кадра не может превышать 40 мс).

К тому же процессор имеет достаточно большую потребляемую мощность по сравнению с ПЛИС (14,4 раз).

Для систем передачи данных с помощью лазерного луча важно знать не только точное местонахождение передатчика в данный момент времени, но и уметь прогнозировать его положение в следующий момент времени.

С целью проверки качества классификации разработанного алгоритма было проведено моделирование по обработке полученных координат некоторыми методами прогнозирования на реальных изображениях бань трасс, предоставленных ЗАО «КИА Системы» (г. Москва, Россия).

В табл. 6 представлены данные о средней погрешности прогнозирования некоторых методов прогнозирования для предварительной обработки по методу сечений и методами «грубой-точной» оценки координат пятен лазерных пучков с использованием метода прямого параллельно-иерархического преобразования ($\delta x_{ср}$ – средняя относительная погрешность метода, рассчитывалась между действительным и прогнозируемым значением). Данные алгоритмы были промоделированы в программе STATISTICA 6.0. Как видно из таблицы, для одних и тех же методов, «грубой-точной» оценки координат пятен лазерных пучков с использованием метода прямого параллельно-иерархического преобразования на 15 – 20% лучше, чем отдельно метод сечений.

Таблица 6 – Сравнительный анализ некоторых методов прогнозирования для различных видов предварительной обработки данных

Метод прогнозирования		
Название метода	Метод сечений $\delta x_{ср}$, %	Метод «грубой-точной» оценки, $\delta x_{ср}$, %
	Числовые методы [13]	
1. Экспоненциальное сглаживание, аддитивная модель	0.18	0.15
2. Экспоненциальное сглаживание, модель Винтера (мультипликативная модель)	0.185	0.14
3. Авторегрессионная модель [14]	0.09	0.077
	Нейронные сети	
4. Радиально-базисная функция РБФ S5 [16]	0,12%	0,085
5. Линейная сеть S5 [17]	0,114	0,076
6. Многослойный персептрон MP5-2-1 с одним сокровенным слоем	0,11%	0,077%

Выводы

В статье рассмотрена проблема прохождения лазерного излучения в атмосфере для атмосферно-оптических линий связи. Установлено, что для обеспечения позиционирования приемо-передающих устройств необходимо классифицировать изображения, с целью выделения не зашумленных изображений.

Для выполнения этой задачи с высокой точностью предложено использовать метод прямого параллельно-иерархического преобразования, который имеет адаптивные свойства, похожие на нейронные сети. С целью ускорения операций по обработке пятен лазерных пучков был создан комбинированный метод «грубо-точной» оценки лазерных пучков с использованием метода прямого параллельно-иерархического преобразования и его реализацию на ПЛИС. Также создан макет для его проверки. На основе исследований установлено, что:

1. Установлено, что ПЛИС, за счет распараллеливания процессов, имеет значительный выигрыш по сравнению с ПК как по быстродействию, так и по экономии энергии.

2. Отмечено, что разработанный метод имеет погрешность прогнозирования на 15 – 20 % меньше по сравнению с методом сечений.

Кроме этого, стоит отметить, что разработанные методы можно использовать в лазерной локации и лазерном сканировании.

Список литературы

1. Joshua Buck. NASA Laser Communication System Sets Record with Data Transmissions toand from Moon / Joshua Buck, Dewayne Washington [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nasa.gov/mission_pages/ladee
2. http://www.federalspace.ru/19038/
3. Borovoy A.G. Laser beam propagation through the turbulent atmosphere with precipitation / A.G. Borovoy, G.Ya. Patrushev, A. I. Petrov // Applied Optics. – 1988. – Vol. 27, Issue 17. – P. 3704-3714
4. Hugo Weichel, Laser Beam Propagation in the Atmosphere, SPIE, Vo.: TT03, 1990., p-108.
5. Medina-Carnicer R., Muñoz-Salinas, R. Yeguas-Bolivar, E. Diaz-Mas, L. A novel method tolook for the hysteresisthresholds for the Cannyedge detector, Pattern Recognition, 44 (6), pp. 1201-1211 (2011).
6. A novel histogram transformation to improve the performance of thresholding methods in edge detection / Rafael Medina Carnicer, Rafael Muñoz-Salinas, Ángel Carmona Poyato, Francisco José Madrid-Cuevas // Pattern Recognition Letters. – 2011. – 32 (5). – P. 676-693.
7. Automatic generation of consensus ground truth for the comparison of edge detection techniques / Nicolás Luis Fernández García, Ángel Carmona Poyato, Rafael Medina Carnicer, Francisco José Madrid-Cuevas // Image Vision Comput. – 2008. – № 26 (4). – P. 496-511.
8. A new sectioning method for classification of optical objects based on PLD / M. Petrovski, L. Tymchenko, N. Kokryatskaya, V. Gubernatorov, Y. Kutaev // Journal of Computer Visionand Image Processing. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 33-51.
9. Timchenko L.I. A multistage parallel-hierarchic network as a model of a neuro like computations cheme / L.I. Timchenko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2000. – 36, № 2. – P. 251-267.
10. The Q-transformation method applying to the facial images normalization/ V.P. Kozhemyako, Y.F. Kutaev, L.I. Timchenko, S.V. Chepornyuk, R.R. Hamdi, A.A. Gertsiy, I.D. Ivasyuk // Proc. International ICSC/IFAC Symposiumon NEURAL COMPUTATION–NC'98. – Vienna, 1998. – P. 287-291.
11. William K. Pratt, Introduction to Digital Image Processing / William K. – CRC Press, 2013. – 708p.
12. Paolo Giudici. Applied data mining: statistical methods for business and industry / Paolo Giudici. – John Wiley and Sons, 2003. – P. 111-117.
13. BrockwellandP.J. Introduction to Time Series and Forecasting, secondedition / P.J. Brockwelland, R.A Davis. – Springer-Verlag, NewYork., 2002,
14. Box George. Time series analysis: forecasting and control / Box George, Jenkins Gwilym. – rev. 3 Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA, 1994. – 592 p.
15. Haykin S., Neural Networks / Haykin S. – [2nd ed.]. – New Jersey: Prentice Hall, 1999. – 1104 p.

Статья поступила в редакцию 02.04.2014.